

# Progetto meccatronico per la sbavatura robotizzata di manufatti dalla geometria incognita

Giacomo Ziliani, Giovanni Legnani, Nicola Pedrocchi, Antonio Visioli

La contornatura robotizzata basata sul controllo ibrido di forza/velocità è stata spesso suggerita come metodo applicabile alla sbavatura robotizzata di manufatti dalla geometria incognita; tuttavia ad oggi pochi sono gli esempi applicativi di tale approccio. In questo lavoro si cerca di colmare tale lacuna, presentando un sistema per l'eliminazione delle bave basato su un algoritmo per la contornatura robotizzata di sagome piane. Grazie ad un sensore di forza montato tra end-effector e fresa, un manipolatore è in grado di rilevare il contatto con la superficie e di percorrerne il contorno controllando la forza scambiata e la velocità tangenziale. Nel lavoro si mostra come sia necessario compensare le forze dovute all'asportazione del materiale per una corretta stima della direzione di contatto; inoltre viene presentato il prototipo di una fresa per sbavare sviluppata nel corso della ricerca. La bontà dell'approccio è confermata da verifiche sperimentali.

## Keyword

*Sbavatura robotizzata, Controllo Ibrido Forza/Velocità, Controllo di Forza, Robot Industriali, Contour Tracking*

Le pressanti esigenze di flessibilità imposte dal mercato richiedono lo sviluppo di sistemi in grado di adattarsi con semplicità ai frequenti cambiamenti della produzione. In alcune applicazioni industriali i robot vengono utilizzati in ambienti non del tutto strutturati dove le tradizionali modalità di controllo possono essere insufficienti. In questo contesto, l'utilizzo di sistemi in grado di modificare il comportamento del manipolatore in funzione delle mutate condizioni di esercizio potrebbe rappresentare un passo avanti nella direzione di una maggiore flessibilità dei processi produttivi. Questo è soprattutto vero in alcune applicazioni come la molatura, la sbavatura e la lucidatura dove sempre più spesso vengono impiegati manipolatori.

Solitamente in questi compiti al robot è richiesto di seguire un percorso prestabilito, magari ottenuto mediante un digitalizzatore meccanico da un pezzo già finito e affidando ad opportune cedevolezza il compito di limitare le forze di interazione. In questi ambiti, la possibilità di operare senza conoscere la geometria del manufatto ridurrebbe drasticamente la fase di programmazione e inoltre il controllo della forza di interazione tra utensile e superficie ridurrebbe i rischi di eventuali danni.

Il contour tracking basato sul controllo ibrido di forza/velo-

rità rappresenta un importante esempio di come sia possibile delegare una larga autonomia decisionale al controllore per poter operare in ambienti poco strutturati. In questo lavoro si mostrerà come tale algoritmo possa essere utilizzato anche in operazioni di rilevante interesse industriale quale la sbavatura robotizzata.

## L'algoritmo per il contour tracking

Con il termine "contour tracking" ci si riferisce solitamente alla contornatura robotizzata di un profilo dalla geometria non conosciuta eseguito mediante un manipolatore. Tra i vari algoritmi esistenti, il controllo ibrido forza/velocità (forza/posizione) è particolarmente adatto in quanto consente di controllare in direzioni complementari la forza e la velocità (o posizione). Un sensore di forza montato sull'end-effector fornisce le informazioni necessarie ad individuare la direzione della tangente e della normale al profilo in modo da poter controllare la forza nella prima e la velocità (o posizione) nella seconda.

Il manipolatore utilizzato per la sperimentazione e lo sviluppo del sistema è un robot SCARA (Icomatic 03) presente nel laboratorio di Meccanica dei Robot dell'Università di Brescia i cui dati tecnici, unitamente ad alcune informazioni relative al sensore di forza e al controllore adottato, sono elencate nella tabella.

Nella figura 1 è rappresentato in forma schematica il manipolatore in contatto con la superficie. Gli assi  $n$  e  $t$  individuano rispettivamente la direzione normale e tangenziale al profilo nel punto di contatto e determinano il cosiddetto *task fra-*

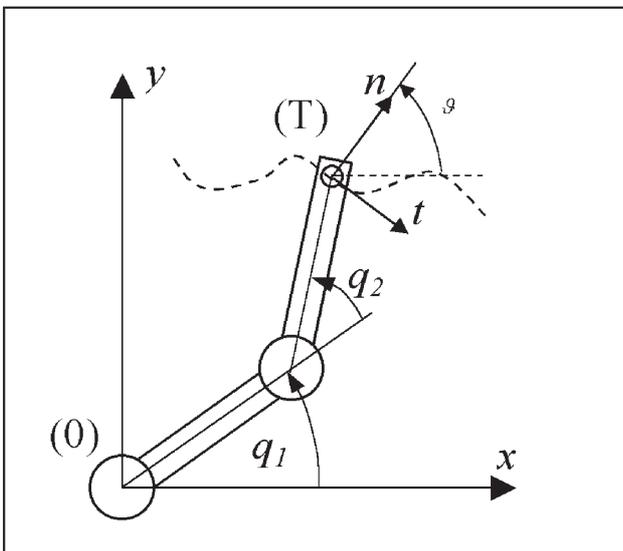
G. Ziliani, G. Legnani, N. Pedrocchi, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Brescia; A. Visioli, Dipartimento di Elettronica per l'Automazione, Università di Brescia

me (T). L'inclinazione dell'asse n rispetto all'asse x del riferimento assoluto (0) è indicata con θ.

**Tabella 1**

Robot	SCARA Icomatic 03
g.d.l. totali	3
Lunghezza 1° link	0,33 m
Lunghezza 2° link	0,33 m
3° link	Bloccato per l'applicazione planare
Motori	C.C.
Azionamenti	PWM
Encoder	Incrementali 2000 step/giro
Velocità giunti	Derivazione numerica della posizione
Sensore di forza	ATI 65/5 gamma
Forza max (lineare)	65 N
Coppia max (lineare)	5 N
Sensibilità	0,05 N
Controllore	PC real time
Sistema operativo	QNX
linguaggio	C++
Frequenza controllo	1 kHz

**Tab 1 - Dati tecnici del sistema utilizzato per la sperimentazione**



**Figura 1 - Schema di un robot SCARA in contatto con la superficie da contornare**

Siano :  
 $J(Q)$  la matrice jacobiana del robot;  
 $Q=[q_1, q_2]^T$  e  $\dot{Q}=[\dot{q}_1, \dot{q}_2]^T$  e i vettori della posizione e velocità angolare ai giunti;  
 $F_{(0)}=[F_x, F_y]^T$  il vettore della forza di contatto misurata dal sensore in (0);

$F_{(T)}=[F_v, F_n]^T$  il vettore delle forze di contatto misurata dal sensore in (T);

$V_{(0)}=[V_x, V_y]^T$  il vettore della velocità della pinza nel riferimento (0);

$V_{(T)}=[V_v, V_n]^T$  il vettore della velocità della pinza nel riferimento (T).

Valgono le seguenti relazioni:

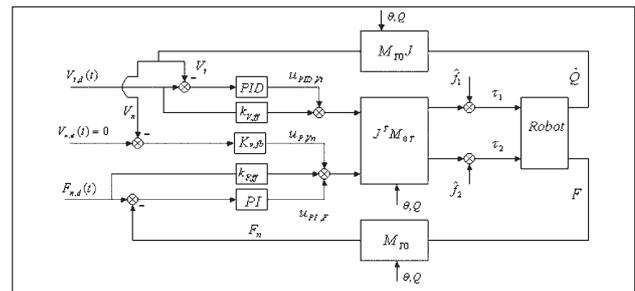
$F_{(0)}=M_{OT}(\theta)F_{(T)}$  dove  $M_{OT}$  è la matrice di rotazione tra il riferimento (T) e (0);

$V_{(T)}=M_{TO}(\theta)V_{(0)}=M_{TO}(\theta)J(Q)\dot{Q}$  dove  $M_{TO}(\theta)$  è la matrice di rotazione tra il riferimento (0) e (T) tale che  $M_{TO}(\theta)^{-1}=M_{OT}(\theta)$ .

In assenza di forze tangenziali ad esempio dovute dall'attrito tra pinza e superficie, l'angolo q può essere calcolato come:

$$\vartheta = \arctan 2(F_y, F_x) = \arctan \left( \frac{F_y}{F_x} \right) \pm \pi$$

ovviamente in presenza di forze tangenziali non trascurabili come quelle scambiate durante una lavorazione ad asportazione di truciolo tale stima deve essere modificata.



**Figura 2 - Schema di controllo ibrido forza/velocità con retroazione di velocità normale**

Nella figura 2 è riportato lo schema del controllo ibrido di forza/velocità esplicito che è stato utilizzato.

Secondo tale schema la coppia richiesta ai motori viene calcolata come:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = J^T(Q)M_{OT}(U_{(T)} + K_R R) + \hat{f}$$

dove:

$R=[V_{t,d}, F_{n,d}]^T$  è il vettore dei riferimenti di velocità tangenziale e forza normale;

$K_R=diag[k_{v,ff}, k_{F,ff}]$  è la matrice dei guadagni per l'azione in avanti;

$\hat{f}=[\hat{f}_1(\dot{q}_1), \hat{f}_2(\dot{q}_2)]^T$  è una stima dell'attrito ai giunti [3]; mentre:

$$U_{(T)} = \begin{bmatrix} u_{PID,V} \\ u_{PI,F} + K_{v,fb}(V_{n,d}(t) - V_n(t)) \end{bmatrix}$$

è il vettore che contiene l'azione di comando del regolatore PID di velocità  $u_{PID,V}$ , quella del regolatore PI di forza  $u_{PI,F}$  e quella dovuta alla retroazione di velocità normale al profilo

$K_{v,fb}(V_{n,d}(t)-V_n(t))$  dove  $V_{n,d}(t)=0$  è il set point di velocità normale al profilo identicamente nullo,  $V_n(t)$  è la velocità della pinza proiettata nella direzione normale e  $K_{v,fb}$  è un guadagno proporzionale.

La retroazione di velocità normale è stata utilizzata per supplire alla mancanza del termine derivativo nel regolatore della forza [4].

### Forze di contatto nel processo di sbavatura

Le forze generate dal processo di asportazione del materiale che costituisce le bave, da parte dei taglienti dell'utensile, vengono misurate dal sensore unitamente alle forze di contatto, causando una errata stima della direzione normale al profilo. Queste forze non sono facilmente modellizzabili a priori, in quanto in base al tipo di applicazione risultano funzione di numerosi parametri quali le velocità di taglio, geometria dell'utensile, affilatura e numero dei taglienti, materiale da lavorare e materiale costituente l'utensile, profondità di passata, verso di avanzamento rispetto alla rotazione della fresa, lubrificazione ecc.

A parità di parametri di processo, si può supporre che la forza di taglio possa considerarsi proporzionale alla quantità di materiale asportato, e che a velocità di avanzamento costante la forza dovuta all'asportazione del materiale sia proporzionale alla profondità di passata.

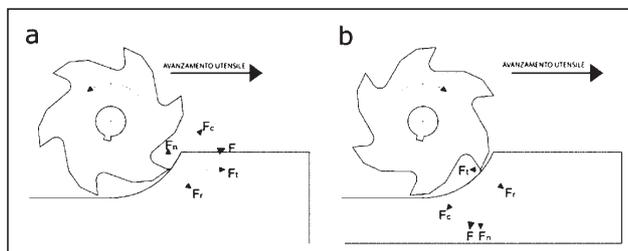


Figura 3 - Forze di taglio nel caso di lavorazione discorde (a) e concorde (b)

Supponiamo per semplicità che tutte le forze scambiate tra fresa e superficie da lavorare agiscano in un punto, come se ad ogni istante ci fosse un solo dente della fresa in presa. Tale situazione è illustrata nella figura 3. Nel punto di contatto si genera una forza di taglio  $\vec{F}_c$  diretta come la velocità tangenziale dell'utensile e una forza perpendicolare diretta radialmente  $\vec{F}_r$ . La forza radiale è solitamente proporzionale alla forza tangenziale:  $F_r = F_c \tan(\beta + \gamma)$  dove  $\beta$  e  $\gamma$  sono rispettivamente gli angoli d'attrito e di spoglia frontale.

La somma vettoriale  $\vec{F}_c + \vec{F}_r$  fornisce la forza totale  $\vec{F}$ . Le forze  $\vec{F}_n$  e  $\vec{F}_T$  sono la scomposizione della forza totale  $\vec{F}$  rispettivamente nella direzione normale e tangenziale al profilo. Si può notare che la forza di taglio non è diretta solo in direzione tangenziale alla superficie ma presenta una componente normale il cui segno dipende dai versi relativi tra velocità di taglio e avanzamento. Nel caso discorde (a) la forza esercitata sul pezzo ha una componente  $\vec{F}_T$  diretta nel verso

dell'avanzamento, mentre quella normale  $\vec{F}_n$  ha verso uscente dalla superficie. Sull'utensile ovviamente nasceranno le stesse forze ma dirette in senso opposto, in particolare la componente  $\vec{F}_n$  tirerà l'utensile contro la superficie facendo aumentare la forza di contatto con il rischio di impuntamento della fresa. Al contrario nel caso concorde (b) la forza normale  $\vec{F}_n$  tende a respingere l'utensile facendolo distaccare dalla superficie. Per eliminare completamente una bava sarebbe necessario far variare la profondità di taglio proporzionalmente all'altezza delle bave stesse. La profondità di taglio a parità di parametri tecnologici, dipende dalla forza normale con cui si preme l'utensile sul pezzo e quindi anche la forza dovrebbe variare assieme all'altezza delle bave. Purtroppo uno degli aspetti più insidiosi del processo di sbavatura è che le bave possono presentare altezze e spessori molto variabili e discontinui inoltre in certi casi la bava non viene completamente erosa ma tende a spezzarsi determinando brusche cali della forze di taglio. Un altro aspetto da sottolineare è che spesso le superfici da lavorare non presentano bave lungo tutto il contorno ma esistono tratti in cui la geometria del manufatto è già corretta: in queste zone senza accorgimenti particolari il solo controllo di forza determinerebbe l'asportazione parziale di materiale con il rischio di uscire di tolleranza, infatti nel contour tracking per poter mantenere il contatto stabile la forza non deve mai annullarsi.

### Stima della normale al profilo in presenza di forze di taglio

Le forze dovute all'asportazione delle bave possono essere misurate in funzione della coppia erogata dalla fresa e dalla conoscenza del raggio dell'utensile. Nel nostro caso poiché la fresa utilizzata è pneumatica la coppia è stata misurata con il sensore di forza.

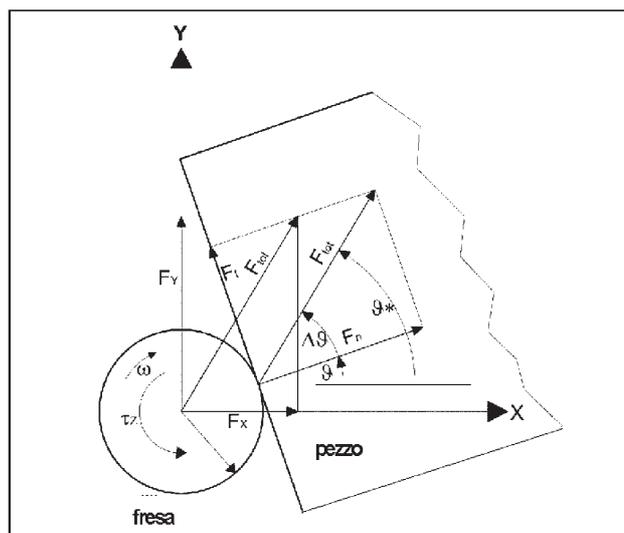


Figura 4 - Le forze esercitate dall'utensile sulla superficie durante la lavorazione nel caso di coincidenza tra asse verticale del sensore e asse di rotazione della fresa

Riferendosi alla figura 4 si ha che:

$F_x$  e  $F_y$  sono le forze lungo l'asse x e y rispetto al riferimento del sensore di forza;

$F_n$  e  $F_t$  sono la forza normale e tangenziale rispetto alla superficie;

$F_{tot} = (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} = (F_n^2 + F_t^2)^{1/2}$  è la forza totale;

$\theta$  è il vero angolo di contatto;

$\theta^*$  è l'angolo di contatto apparente calcolato come  $\arctan 2(F_y, F_x)$ ;

$\Delta\theta$  è l'angolo compreso tra la direzione di contatto vera e apparente;

$\tau_z$  è la coppia lungo l'asse z misurata dal sensore;

$r$  è il raggio della fresa.

Nell'ipotesi che l'asse z del riferimento del sensore coincida con quello di rotazione della fresa la forza tangenziale dovuta all'operazione di asportazione di materiale può essere calcolata come:

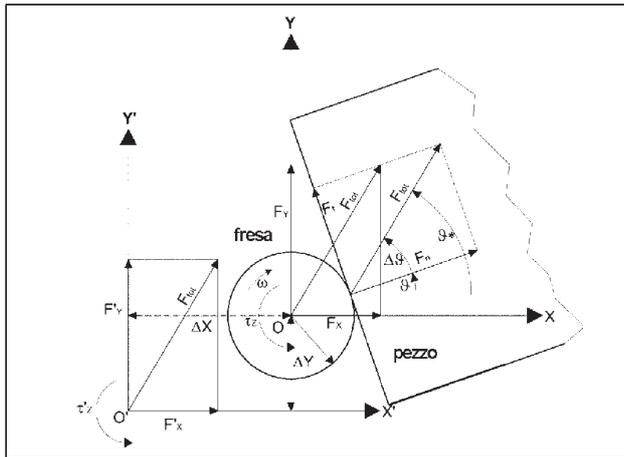
$$F_t = \frac{\tau_z}{r}$$

l'angolo  $\Delta\theta$  può essere calcolato semplicemente come:

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{F_t}{F_{tot}}\right)$$

e quindi l'angolo di contatto corretto sarà:

$$\theta = \theta^* - \Delta\theta = \arctan 2(F_y, F_x) - \arcsin\left(\frac{F_t}{F_{tot}}\right)$$



**Figura 5 - Le forze esercitate dall'utensile sulla superficie durante la lavorazione nel caso di disallineamento tra asse verticale del sensore e asse di rotazione della fresa**

Nella figura 5 è riportato il caso in cui ci sia uno sfasamento tra gli assi verticali di fresa e sensore ed il centro  $O'$  del sensore non coincide con quello della fresa  $O$ . La posizione relativa di  $O'$  rispetto a  $O$  è  $(\Delta x, \Delta y)$ .

La coppia misurata dal sensore  $\tau_z$  non dipenderà solamente dalla forza tangenziale  $F_t$  ma sarà invece pari a:

$$\tau'_z = \tau_z + F_y \Delta x - F_x \Delta y$$

in quanto in  $O'$  oltre alla coppia dovuta alla lavorazione verrà misurato il momento dovuta alla forza di contatto applicata in  $O$ .

La coppia dovuta alla sola lavorazione potrà essere calcolata in questo modo:

$$\tau_z = \tau'_z - F_y \Delta x + F_x \Delta y$$

e quindi la forza tangenziale sarà:

$$F_t = \frac{\tau'_z - F_y \Delta x + F_x \Delta y}{r}$$

L'angolo di contatto corretto può essere ancora calcolato utilizzando l'equazione (2).

Per calcolare lo sfasamento del centro fresa rispetto al sensore può essere utilizzabile un metodo ai minimi quadrati. Se infatti si contorna un oggetto dalla forma qualsiasi e sufficientemente varia, senza attivare la fresa, le coppie misurate dal sensore di forza dipendono esclusivamente dalla forza di contatto e dalla posizione  $(\Delta x, \Delta y)$  della fresa rispetto al sensore. Ad ogni istante di campionamento varrà dunque:

$$\tau_z = -F_x \Delta y + F_y \Delta x$$

è possibile quindi scrivere il seguente sistema:

$$\begin{cases} \tau_{z1} = -F_{x1} \Delta y + F_{y1} \Delta x \\ \tau_{z2} = -F_{x2} \Delta y + F_{y2} \Delta x \\ \vdots \\ \tau_{zN-1} = -F_{xN-1} \Delta y + F_{yN-1} \Delta x \\ \tau_{zN} = -F_{xN} \Delta y + F_{yN} \Delta x \end{cases}$$

con un formalismo matriciale otteniamo:

$$\underline{\tau}_z = \underline{F} \underline{X}$$

con

$$\underline{\tau}_z = \begin{bmatrix} \tau_{z1} \\ \tau_{z2} \\ \vdots \\ \tau_{zN-1} \\ \tau_{zN} \end{bmatrix}, \underline{F} = \begin{bmatrix} -F_{x1} & -F_{y1} \\ -F_{x2} & -F_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ -F_{xN-1} & -F_{yN-1} \\ -F_{xN} & -F_{yN} \end{bmatrix} \text{ e } \underline{X} = \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta x \end{bmatrix}$$

Sia  $\underline{F}^+$  la matrice pseudo inversa di  $\underline{F}$  allora  $\Delta x$  e  $\Delta y$  possono essere stimati applicando il metodo dei minimi quadrati:

$$\underline{X} = \underline{F}^+ \underline{\tau}_z$$

Questa procedura di calibrazione va eseguita un'unica volta ad ogni montaggio della fresa sulla flangia del sensore di forza.

## Fresa prototipale per sbavature

La profondità di passata in un processo di sbavatura dipende dall'altezza delle bave. Nella sbavatura robotizzata comunemente utilizzata in ambito industriale il problema è delegato al controllo di posizione, infatti conoscendola geometria finale del pezzo è sufficiente comandare il robot affinché l'utensile nei movimenti, generi la superficie ideale desiderata.

Se la geometria non è nota questo approccio non è più valido. Per utilizzare l'algoritmo di contornatura robotizzata deve essere garantito un contatto continuo tra pezzo e fresa con uno scambio continuo di forza. Per eliminare le bave si potrebbe modulare il valore della forza in funzione della loro altezza ma questo implicherebbe almeno la conoscenza della loro posizione e dimensione.

Impostare un valore di forza costante potrebbe in certi casi asportare materiale in tratti privi di bave, rovinando il pezzo, o non eliminare completamente bave voluminose rendendo la lavorazione incompleta.

Un'altra problematica legata all'uso del controllo di forza deriva dai rischi di impuntamento, infatti l'assenza del riferimento di posizione nella direzione normale può determinare l'insorgere di elevate forze di contatto non misurate dal sensore poiché dovute esclusivamente all'azione relative dei denti in presa.

Come mostrato in precedenza, nel caso di lavorazione discorde (vedi Figura 3 a) l'azione normale dovuta alla lavorazione genera una forza normale che tende a fare affondare l'utensile nel pezzo. Questa forza si somma alla forza generata dal manipolatore e tende ad auto alimentarsi portando spesso all'impuntamento con l'arresto della fresa.

La soluzione a questi problemi ha portato al progetto e realizzazione di una fresa speciale da essere utilizzata per la sbavatura. La struttura dell'utensile è simile a quella di una tradizionale fresa cilindrica in acciaio super rapido per sbavare con la particolarità che sull'estremità della parte tagliente sono stati montati due cuscinetti a sfera miniaturizzati concentrici all'asse della fresa stessa. Il diametro esterno dei cuscinetti è identico a quello della superficie tagliente dell'utensile.

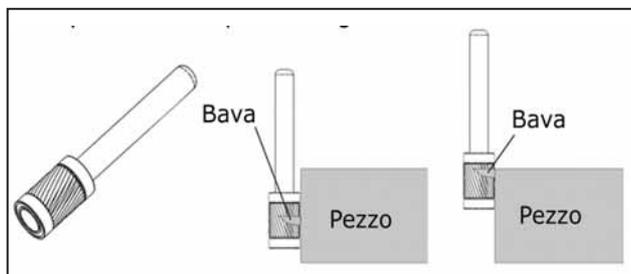


Figura 6 - Fresa prototipale per la sbavatura robotizzata con controllo di forza

L'azione dei due cuscinetti è quella di "guidare" l'utensile lungo il percorso evitando che la fresa penetri nelle superfici

prive di bave. Infatti se la fresa viene posizionata in modo che la bava sia a contatto con il tagliente mentre i cuscinetti premono sulla superficie adiacente, l'utensile potrà eliminare solamente le bave rendendo assolutamente banale la regolazione della forza che potrà essere mantenuta costante.

Un ulteriore vantaggio dell'uso di questo utensile deriva dal fatto che la fresa esercita coppia solo in presenza di bave (l'attrito dei cuscinetti può considerarsi trascurabile) e quindi questa misura può essere utilizzata come sistema per individuarne la presenza e quindi consentire ad esempio di modificare la strategia di controllo. Banalmente in presenza di una bava è possibile fissare un valore di coppia massima oltre la quale si ritiene la bava di grosse dimensioni, si può quindi far ridurre la velocità di tracciamento per dare più tempo alla fresa di eliminarla.

## Esperimenti

La fase sperimentale è stata condotta dotando la pinza del robot di una fresa pneumatica ad alta velocità (20000 giri/min). Il sensore di forza è stato montato tra fresa e flangia e per evitare di introdurre i disturbi dovuti alle vibrazioni si sono filtrate la forza e le coppie misurate mediante un filtro passa basso a 100 Hz.

Il metodo di compensazione delle forze di lavorazione nella stima dell'angolo di contatto è stato verificato nell'asportazione di alcune bave artificiali create mediante un lamierino in ferro stretto tra due piastre metalliche. Il lamierino sporgeva di circa 3 mm dal bordo delle piastre e presentava uno spessore di 1 mm. La forza di contatto è stata fissata a 30 N e il set point di velocità a 5 mm/s e il sistema di riduzione della velocità di tracciamento è stato escluso. Poiché il tratto da sbavare era rettilineo la direzione di contatto era costante.

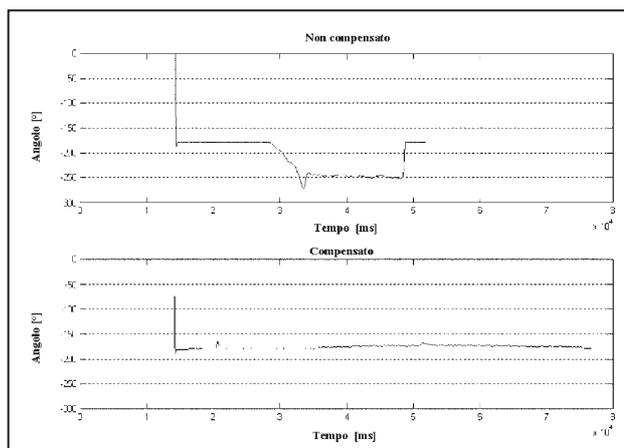
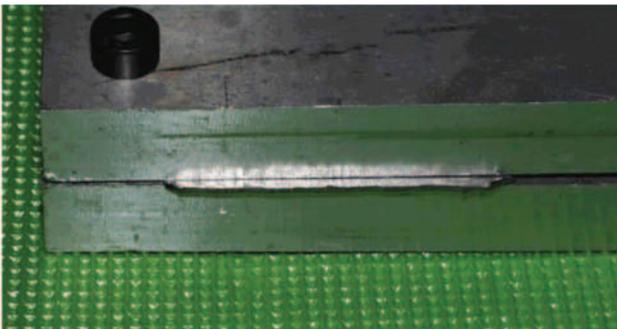


Figura 7 Stima della normale: senza compensazione sopra, con compensazione sotto

Nella figura 7 in alto è riportato l'andamento della stima dell'angolo di contatto durante la lavorazione senza utilizza-

re la compensazione (ovvero utilizzando l'equazione (1)). Come si può notare la stima è errata: a fronte di un angolo reale costante pari a  $-180^\circ$  la stima dell'angolo all'inizio della lavorazione è influenzata dalla forza di taglio che determina un errore di circa  $75^\circ$ .

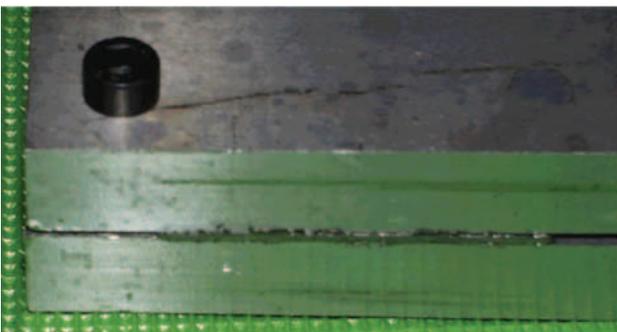
In basso invece è riportato l'andamento della stima con l'uso della compensazione (ovvero utilizzando l'equazione (2)). Come si può notare il valore dell'angolo rimane correttamente inalterato durante tutta la lavorazione. Le lavorazioni ottenute nei due casi sono confrontabili nella figura 8 e 9.



**Figura 8 - Eliminazione di una bava artificiale senza l'uso della compensazione**

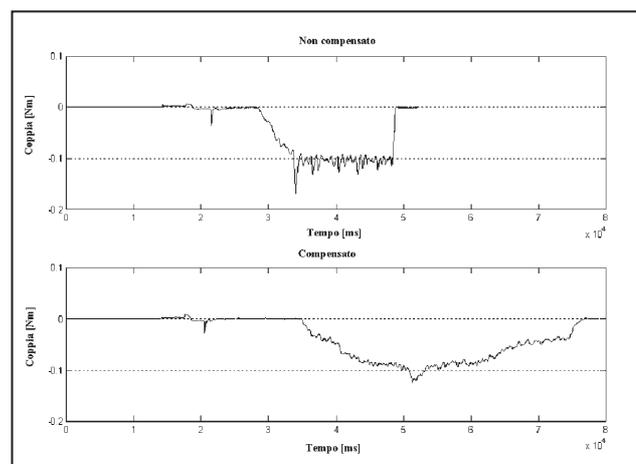
L'effetto dell'errata stima è mostrato nella figura 8. Si può notare che la bava non è stata eliminata completamente ma che la fresa ha contornato la bava senza asportarla a causa dell'errore nella stima dell'angolo di contatto. Infatti l'errata stima dell'orientamento del task frame fa parzialmente inclinare l'asse normale (dove si controlla la forza) nella direzione non vincolata, generando un incremento della velocità di tracciamento reale e una riduzione della forza di contatto. L'incremento della velocità reale e la riduzione della forza normale reale sono la causa della mancata eliminazione della bava. È importante sottolineare che questi errori non sono percepiti dal sistema a causa dell'errata stima dell'angolo di contatto.

Come si può notare nella figura 9 la corretta stima dell'angolo di contatto influenza in modo positivo l'operazione di sbavatura. In questo caso la bava è stata completamente eliminata.



**Figura 9 - Eliminazione di una bava con l'uso della compensazione**

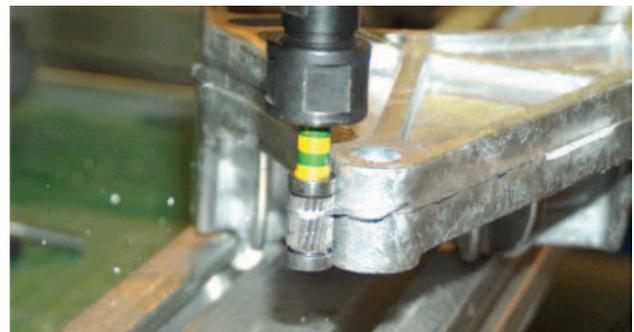
La prova dell'incremento della velocità dovuta all'errata inclinazione del task frame è rappresentata dai grafici della coppia erogata dalla fresa, infatti osservando il tempo in cui la fresa eroga coppia è possibile misurare il tempo di contatto tra fresa e bava. Come si può notare nella figura 10, senza la compensazione il contatto dura circa 2 s, mentre con la compensazione il contatto dura circa il doppio. Poiché la bava in entrambi i casi presentava la medesima lunghezza si deduce che senza la compensazione il robot dopo aver incontrato la bava ha aumentato la sua velocità nella vera direzione tangenziale (nella direzione errata l'anello di controllo continua a funzionare correttamente).



**Figura 10 - Coppia erogata dalla fresa: senza compensazione sopra, con compensazione sotto**

Per testare a fondo le potenzialità del sistema sono state condotte delle prove di sbavatura di alcuni manufatti in lega d'alluminio ottenuti per pressocolata. Tale prova, sia per la complessità della forma che per le dimensioni della bava è abbastanza impegnativa.

In questo caso è stato utilizzato un algoritmo che riduce la velocità di tracciamento in presenza di bave consistenti: la normale velocità di tracciamento è stata fissata a 5 mm/s ed ogni volta che la coppia di lavorazione superava la soglia di 0,05 Nm allora il set point veniva ridotto a 0,8 mm/s.



**Figura 11 - L'utensile per fresare in azione**

Nella figura 11 è riportata un'immagine della fresa in contatto con la superficie durante la lavorazione. Il manufatto prima e dopo il processo di sbavatura è nella figura 12. Come si può notare le bave si presentavano con discontinuità lungo il profilo e con una certa variabilità in altezza e spessore. Il pezzo dopo la sbavatura è risultato invece assolutamente privo di ogni residuo di bava.

### Conclusioni

Le prove sperimentali condotte, i risultati positivi ottenuti e la relativa semplicità realizzativa rendono il metodo descritto particolarmente interessante per un eventuale implementazione industriale.



Figura 12 - Manufatto ottenuto per presso colata prima e dopo la sbavatura

Nella figura 13 invece sono riportati gli ingrandimenti di alcuni tratti di superficie dopo la sbavatura. Come si può osservare l'aspetto superficiale è più che soddisfacente.



Figura 13 - Alcuni particolari delle superfici lavorate

Come si può osservare dal grafico della figura 14 la coppia dovuta all'asportazione delle bave varia molto durante la lavorazione, in particolare si noti come spesso la coppia cali bruscamente (si veda ad es. al tempo  $10^4$  ms) a causa della rottura istantanea della bava. Tale grafico mostra come sia praticamente impossibile poter calcolare a priori un termine compensativo per questo tipo di processo.

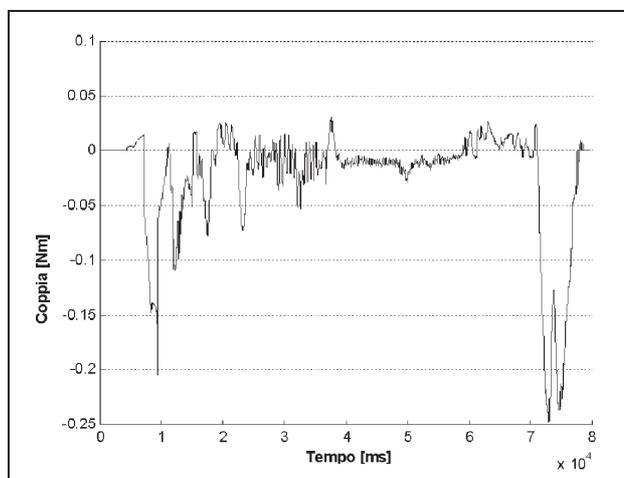


Figura 14 - Coppia erogata dalla fresa per la sbavatura di un manufatto reale

### Bibliografia

- [1] H. Kazerroni, "Automated robotic deburring using impedance control", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 8 No. 1 pp. 21-25, 1988.
- [2] G. Duelen, H. Munch, D. Surdilovic, J. Timm, "Automated force control schemes for robotic deburring: development and experimental evaluation", *Proc. Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, instrumentation, and Automation* San Diego (CA), pp. 912-917, 1992.
- [3] F. Jatta, R. Adamini, A. Visioli, G. Legnani. "Hybrid force/velocity robot contour tracking: an experimental analysis of friction compensation strategies". *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pag. 1723-1728, 2002.
- [4] F. Jatta, G. Legnani, A. Visioli, G. Ziliani, "On the use of velocity feed back in hybrid force/velocity control of industrial manipulators", *Control Engineering Practice*, in stampa.
- [5] G. Ferretti, G. Magnani, P. Rocco, "Triangular force/position control with application to robotic deburring", *Machine Intelligence and Robotic Control*, Vol. 2, pp. 83-91, 2000.
- [6] M. Jinno T. Yoshimi, A. Abe, "Force controlled grinding robot system for unstructured task", *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, Raleigh, (NC), pp. 1117-1124, 1992. ■